

## Aluminum-copper-magnesium alloy sheets with low residual stresses

Patent Number: EP0731185  
Publication date: 1996-09-11  
Inventor(s): HEYMES FABRICE (FR); LEQUEU PHILIPPE (FR); RAYNAUD GUY-MICHEL (FR)  
Applicant(s): PECHINEY RHENALU (FR)  
Requested Patent:  EP0731185, B1  
Application Number: EP19960420077 19960307  
Priority Number(s): FR19950003159 19950310  
IPC Classification: C22C21/16  
EC Classification: C22C21/16  
Equivalents: DE69606208D, DE69606208T,  FR2731440  
Cited Documents: EP0473122; US3826688; FR959650; US2296866; GB572210

### Abstract

An alloy comprises mainly Al with 3.5-5 wt.% Cu, 1.0-2.0% Mg, 0-0.25% Si, 0-0.025% Fe, 0-0.55% Mn and less than 0.25% total of other elements. The value of Mn-2Fe is between 0 and 0.2%. The level of recrystallisation in a piece of the alloy is more than 50% throughout, with no more than 35% variation between the surface and the centre. A bar of alloy which has been tempered and stretched, possibly annealed, then machined to half its thickness and placed on two spaced supports show a degree of bending given by F.E. is less than  $0.14L^2$ , pref. less than  $0.04L^2$ , where F is the bend in microns, E is the bar thickness in mm, and L the support spacing in mm.

Data supplied from the esp@cenet database - I2



(19)

Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 731 185 A1

(12)

## DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

(43) Date de publication:  
11.09.1996 Bulletin 1996/37

(51) Int Cl. 6: C22C 21/16

(21) Numéro de dépôt: 96420077.8

(22) Date de dépôt: 07.03.1996

(84) Etats contractants désignés:  
DE FR GB

- Lequeu, Philippe  
63500 Issoire (FR)
- Raynaud, Guy-Michel  
63500 Issoire (FR)

(30) Priorité: 10.03.1995 FR 9503159

(74) Mandataire: Mugeot, Jean-Claude et al  
PECHINEY  
28, rue de Bonnel  
69433 Lyon Cedex 03 (FR)

(71) Demandeur: PECHINEY RHENALU

92400 COURBEVOIE (FR)

(72) Inventeurs:

- Heymes, Fabrice  
38160 Saint-Marcellin (FR)

## (54) Tôles en alliage Al-Cu-Mg à faible niveau de contraintes résiduelles

(57) Tôle en alliage d'aluminium AlCuMg d'épaisseur > 0,5 mm de composition (% en poids):

3,5 &lt; Cu &lt; 5,0

1,0 &lt; Mg &lt; 2,0

Si &lt; 0,25

Fe &lt; 0,25

Mn &lt; 0,55

total autres éléments: &lt; 0,25

avec la relation: 0 &lt; Mn - 2Fe &lt; 0,2

cette tôle présentant en tout point un taux de recristallisation > 50% et un écart de ce taux entre surface et

mi-épaisseur < 35%, et présentant à l'état trempé et tractionné, ou trempé, tractionné et revenu, une flèche après usinage à mi-épaisseur d'un barreau reposant sur deux supports distants d'une longueur l telle que:  $f_e < 0,14 l^2$

$f$  étant la flèche exprimée en microns,  $e$  l'épaisseur de la tôle en mm et  $l$  la longueur du barreau en mm.

La tôle selon l'invention présente un niveau réduit de contraintes résiduelles après trempe et une tenacité améliorée pour les tôles épaisses, tout en maintenant les autres propriétés requises pour leur utilisation dans la construction aéronautique.

EP 0 731 185 A1

**D**escription**Domaine technique**

5 L'invention concerne des tôles fortes (épaisseur > 12 mm), moyennes (épaisseur comprise entre 3 et 12 mm) ou minces (épaisseur comprise entre 0,5 et 3 mm) en alliage d'aluminium Al-Cu-Mg à haute résistance, appartenant à la série 2000 selon les désignations de l'Aluminum Association des USA, présentant après trempe un faible niveau de contraintes résiduelles, tout en gardant des caractéristiques mécaniques statiques (résistance à la rupture, limite élastique et allongement) élevées, une très bonne tolérance aux dommages, une faible vitesse de propagation de fissures 10 et une bonne tenue en fatigue, cet ensemble de propriétés étant particulièrement adapté à leur utilisation dans la construction aéronautique. Ces tôles peuvent être utilisées nues ou plaquées avec un autre alliage d'aluminium présentant, par exemple, une meilleure résistance à la corrosion.

**Etat de la technique**

15 Les contraintes résiduelles présentes dans les tôles d'aluminium à durcissement structural proviennent de la trempe qu'il est nécessaire d'effectuer pour leur procurer de bonnes propriétés mécaniques. Le choc thermique engendré par le refroidissement brutal à partir des hautes températures nécessaires à la mise en solution des éléments d'addition, conduit à de très fortes contraintes internes.

20 Ces contraintes sont gênantes car elles entraînent des déformations importantes lorsque les tôles sont usinées, ce qui est fréquemment le cas dans la construction aéronautique. Pour diminuer ces contraintes, on recourt à divers procédés de détensionnement après trempe, par exemple une traction ou une compression contrôlée, permettant de réduire les contraintes internes sans affecter les propriétés du produit, comme le ferait un traitement thermique. La recherche dans ce domaine a consisté essentiellement à optimiser les opérations de traction ou de compression nécessaires pour assurer un détensionnement efficace.

25 Par ailleurs, beaucoup de travaux ont été effectués sur l'opération de trempe elle-même. Celle-ci est généralement effectuée par immersion ou aspersion avec de l'eau froide et les vitesses de refroidissement obtenues de cette manière sont souvent inutilement élevées. En effet, chaque alliage possède une vitesse critique de trempe; si on refroidit moins vite que cette vitesse critique, on a une décomposition de la solution solide entraînant une baisse importante des 30 caractéristiques mécaniques finales ainsi que de la tolérance aux dommages. Il faut donc tremper plus vite que cette vitesse critique, mais il est inutile d'aller beaucoup au-delà, car on sait que, plus le refroidissement est intense, plus les contraintes internes sont élevées.

Il y a ainsi un compromis à trouver pour optimiser la trempe des tôles avec un refroidissement qui évite toute diminution des caractéristiques mécaniques finales et minimise les contraintes internes.

**But de l'invention**

35 L'invention a pour but d'obtenir, sur des tôles en alliage à durcissement structural du type Al-Cu-Mg, un niveau réduit de contraintes résiduelles après trempe, tout en maintenant des caractéristiques mécaniques statiques (résistance à la rupture, limite élastique et allongement) et une tenue en fatigue aussi élevées que celles des alliages actuels, et en améliorant, pour les tôles fortes, la tenacité dans les différentes directions et la vitesse de fissuration dans les 40 directions long-travers (L-T) et travers-long (T-L), sans rien changer pour autant aux procédures couramment utilisées pour la trempe et le détensionnement.

**Objet de l'invention**

L'invention a pour objet une tôle d'épaisseur > 0,5 mm en alliage d'aluminium de composition (% en poids):

3,5 < Cu < 5,0

1,0 < Mg < 2,0

50 Si < 0,25

Fe < 0,25

Mn < 0,55

total autres éléments < 0,25

avec 0 < Mn - 2Fe < 0,2

55 éventuellement plaquée sur 1 ou 2 faces d'un autre alliage d'aluminium ayant une épaisseur totale n'excédant pas 12% de l'épaisseur totale de la tôle plaquée, cette tôle présentant en tout point un taux de recristallisation > 50% et un écart de taux de recristallisation entre la surface et la mi-épaisseur < 35%, et présentant à l'état trempé et tractionné, ou trempé, tractionné et revenu, une flèche f après usinage à mi-épaisseur d'un barreau reposant sur deux supports

distsants d'une longueur  $l$ , telle que:

$fe < 0,14 l^2$  de préférence:

$fe < 0,09 l^2$  et ncore préférentiellement:

$fe < 0,06 l^2$   $f$  étant mesurée en microns,  $e$  étant l'épaisseur de la tôle en mm et  $l$  étant également mesuré en mm.

5 Pour les tôles minces d'épaisseur < 3 mm, la flèche est telle que:

$fe < 0,04 l^2$

De préférence, le fer est inférieur à 0,2%, le silicium à 0,17% et même 0,10%, le cuivre à 4%, le magnésium à 1,5% et le manganèse à 0,4%.

10 Les tôles présentent à l'état trempé une limite élastique  $R_{0,2}$  dans le sens travers long supérieure à 290 MPa, et à l'état trempé revenu, supérieure à 400 MPa. Lorsqu'il s'agit de tôles plaquées, comme par exemple celles utilisées pour la fabrication des fuselages d'avions, on pratique généralement un placage 2 faces en alliage d'aluminium peu chargé et présentant une bonne résistance à la corrosion, chaque couche de placage pouvant représenter entre 4 et 6% de l'épaisseur totale pour les tôles les plus minces jusqu'à 2 à 4% de l'épaisseur totale pour les tôles d'épaisseur > 1,6 mm, ce qui fait que l'épaisseur totale du placage n'excède jamais 12% de cette épaisseur totale. Pour ces tôles 15 plaquées, les limites d'élasticité dans les sens L-T et T-L sont respectivement supérieures à 270 et 380 MPa.

Les tôles présentent une tenue en fatigue, mesurée sur éprouvettes plates à facteur de concentration de contrainte  $K_t = 2,3$  avec un rapport  $R$  entre contrainte minimale et maximale de 0,1, telle que les contraintes acceptables à nombre de cycles donné sont supérieures à:

20 295 MPa pour  $10^4$  cycles

160 MPa pour  $10^5$  cycles

100 MPa pour  $10^6$  cycles

100 MPa pour  $10^7$  cycles

Les tôles fortes d'épaisseur > 20 mm en alliage à moins de 0,2% de Fe présentent à l'état trempé et tractionné des tenacités mesurées par le facteur d'intensité de contrainte critique en déformation plane  $K_{Ic}$  dans les sens L-T et T-L respectivement supérieures à 35 et 32 MPav/m, et de préférence supérieures à 40 et 35 MPav/m.

25 A l'état trempé, tractionné et revenu, ces tenacités sont respectivement supérieures à 28 et 25 MPav/m, et de préférence supérieures à 32 et 28 MPav/m.

Les tenacités mesurées dans le sens S-L pour les tôles d'épaisseur > 35 mm sont supérieures à 22, et de préférence 24 MPavm, à l'état trempé tractionné, et supérieures à 18, et de préférence 20 MPavm, à l'état trempé, tractionné et revenu.

30 Les tôles fortes présentent aussi, dans les sens L-T et T-L, une vitesse de fissuration da/dn pour un chargement avec  $R = 0,1$  inférieure à:

$$5 \cdot 10^{-5} \text{ mm/cycle pour } \Delta K = 10 \text{ MPavm}$$

$$35 \quad 10^{-4} \text{ mm/cycle pour } \Delta K = 15 \text{ MPavm}$$

$$6 \cdot 10^{-4} \text{ mm/cycle pour } \Delta K = 20 \text{ MPavm}$$

$$40 \quad 2 \cdot 10^{-3} \text{ mm/cycle pour } \Delta K = 25 \text{ MPavm}$$

Le code d'orientation des sens L-T, T-L et S-L est défini dans la norme ASTM E 399 relative aux essais de tenacité des matériaux métalliques.

45 Les tôles d'épaisseur inférieure à 20 mm présentent une tenacité mesurée par le facteur d'intensité de contrainte critique en contrainte plane  $K_{cb}$ , dans le sens T-L, supérieure à 110 MPavm. Elle est mesurée sur une éprouvette de largeur 405 mm, avec une longueur d'entaille de 100 mm, et une épaisseur égale à celle de la tôle jusqu'à 6 mm et de 6 mm au-delà, cette épaisseur étant obtenue après un surfâge symétrique.

#### Description de l'invention

50 Contrairement aux axes de recherche de l'art antérieur, les inventeurs ont recherché la réduction des contraintes résiduelles au niveau des paramètres métallurgiques intervenant en amont de la trempe.

Les possibilités de s'écartez des compositions des alliages existants pour les éléments d'addition majeurs (Cu et Mg) étant très réduites à cause des propriétés mécaniques élevées qu'il est nécessaire d'obtenir, les inventeurs ont recherché des modifications des teneurs en éléments d'addition mineurs et ont trouvé que les meilleurs résultats en termes de réduction des contraintes résiduelles, et donc de stabilité à l'usinage, étaient obtenus lorsque les teneurs pondérales en fer et manganèse étaient telles que:

55  $Mn < 0,55\%$   $Fe < 0,25\%$  et

$0 < Mn - 2Fe < 0,2\%$

Celà signifie que, plus la teneur en fer est basse, plus celle en manganèse doit être abaissée. Or, la teneur en fer des alliages Al-Cu a tendance à baisser régulièrement comme en témoigne par exemple l'évolution, au cours des 20 dernières années, des compositions déposées à l'Aluminum Association pour les alliages 2024, 2124, 2224 et 2324, alors que, dans ces compositions successives, la teneur en Mn n'a pas changé. En ajustant la température de sortie du laminage à chaud, on obtient avec les compositions selon l'invention une microstructure largement recristallisée, avec un taux de recristallisation toujours supérieur à 50% et un gradient de recristallisation entre la surface et le cœur de la tôle toujours inférieur à 35%. Ceci est particulièrement remarquable pour les tôles épaisses qui présentent, à mi-épaisseur, une structure nettement plus recristallisée que les tôles de l'art antérieur de même composition en éléments majeurs.

Contrairement à ce à quoi pouvait s'attendre le métallurgiste spécialiste des alliages d'aluminium de haute résistance, cette structure très recristallisée et les basses teneurs en Mn, qui participe au durcissement de l'alliage grâce aux fins précipités Al<sub>2</sub>OCu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> et AlMn<sub>6</sub>, n'affectent pas de façon significative les caractéristiques mécaniques statiques de la tôle. De plus, on constate que les propriétés de fatigue sont également conservées, alors qu'on aurait pu s'attendre également à une diminution de la résistance à la fatigue.

De plus, dans le cas des tôles fortes d'épaisseur > 20 mm, les inventeurs ont constaté, de manière inattendue, que la structure largement recristallisée conduisait à des tenacités, mesurées par le facteur  $K_{1c}$  d'intensité de contrainte critique en déformation plane selon la norme ASTM E 399, supérieures dans toutes les directions.

Enfin, ces tôles épaisses à structure largement recristallisée présentent des vitesses de fissuration dans les sens L-T et T-L plus faibles que les tôles de même composition en éléments majeurs de l'art antérieur. Elles permettent ainsi de réaliser un compromis très intéressant entre les caractéristiques mécaniques statiques et les propriétés de tolérance aux dommages (tenacité et vitesse de fissuration).

Pour les tôles minces, les inventeurs ont constaté une influence positive de la composition selon l'invention sur l'allongement dans le sens travers-long de la tôle, contrairement à l'idée généralement admise d'un effet favorable des teneurs élevées en Mn et Fe sur cet allongement, puisque les fins précipités au manganèse permettent d'homogénéiser la déformation en limitant la formation de bandes de déformation. De même, il était généralement admis par les métallurgistes que, pour des tôles minces ou moyennes, une structure très recristallisée et à grains fins, reconnue comme étant bénéfique à l'allongement, était plutôt obtenue avec des teneurs en Mn et Fe élevées.

Ainsi, la baisse de la teneur Mn - 2Fe en dessous du seuil de 0,2% conduit, aussi bien pour les tôles minces que pour les tôles épaisses, non seulement à une réduction des contraintes résiduelles entraînant une meilleure stabilité à l'usinage, mais également à un ensemble de propriétés d'emploi particulièrement intéressant pour la construction aéronautique. Il n'est cependant pas souhaitable que la valeur de Mn - 2Fe devienne négative, car on constate alors une dégradation des caractéristiques mécaniques sans gain supplémentaire dans la réduction des contraintes internes.

Les tôles selon l'invention présentent, à l'état trempé et tractionné, ou à l'état trempé, tractionné et revenu, un niveau de contraintes résiduelles tel que la flèche  $f$  mesurée après usinage à mi-épaisseur d'un barreau reposant sur deux supports distants d'une longueur  $l$  est telle que:

$$fe < 0,14 l^2 f \text{ étant mesurée en microns, l'épaisseur } e \text{ de la tôle et la longueur } l \text{ étant exprimées en mm.}$$

Cette flèche est mesurée de la manière suivante. On prélève dans la tôle d'épaisseur  $e$  deux barreaux: l'un appelé barreau sens L, de longueur  $b$  dans le sens de la longueur de la tôle (sens L), de largeur 25 mm dans le sens de la largeur de la tôle (sens TL) et d'épaisseur  $e$  selon la pleine épaisseur de la tôle (sens TC); l'autre, appelé barreau sens TL, ayant 25 mm dans le sens L,  $b$  dans le sens TL et  $e$  dans le sens TC.

On usine chaque barreau jusqu'à mi-épaisseur et on mesure la flèche à mi-longueur du barreau. Cette flèche est représentative du niveau de contraintes internes de la tôle et de son aptitude à ne pas se déformer à l'usinage.

Pour les tôles fortes d'épaisseur supérieure à 20 mm, la longueur  $b$  des barreaux est de  $5e + 20$  mm. L'usinage est un usinage mécanique progressif avec des passes d'environ 2 mm.

La mesure de la flèche à mi-longueur s'effectue à l'aide d'un comparateur au micron près, au milieu du barreau positionné entre deux couteaux distants de  $l = 5e$ , le barreau dépassant de 10 mm de part et d'autre des couteaux.

Pour les tôles d'épaisseur < 20 mm, la longueur  $b$  du barreau est de 400 mm et la longueur  $l$  utilisée pour la mesure de la flèche est fixe à 300 mm.

Pour les épaisseurs entre 8 et 20 mm, l'usinage est un usinage mécanique avec des passes de 1 mm. En dessous de 8 mm, l'usinage est chimique dans un bain de soude. Une des faces du barreau est protégée à l'aide d'un masque en plastique souple déposé avant l'essai. L'échantillon est sorti du bain d'attaque et son épaisseur est contrôlée toutes les 15 mn.

Pour les tôles minces d'épaisseur < 2 mm, la méthode est légèrement différente. La mesure de la flèche est effectuée avec le barreau posé sur le chant (longueur, demi-épaisseur) sur une feuille de papier millimétré, elle-même posée sur une surface horizontale, ce qui permet de mesurer la flèche à 0,5 mm près, en supprimant l'influence du poids propre du barreau et de la force du comparateur sur la flèche à mi-longueur.

Les inventeurs ont également constaté que l'anisotropie de déformation pouvait être améliorée. Ainsi, pour les tôles selon l'invention, les flèches mesurées sur les barreaux sens long et sens travers du laminage sont telles que:

(flèche sens L) < 1,5 (flèche sens TL)

Pour les tôles minces et moyennes d'épaisseur < 12 mm, on constate que la rugosité après usinage chimique est inférieure à 6 microns et, pour les tôles d'épaisseur < 4 mm inférieure à 3 microns.

L'invention s'applique également à des produits en alliage d'aluminium autres que des tôles, par exemple des produits filés, forgés ou matricés. Dans ce cas, l'épaisseur e du barreau est l'épaisseur locale de la pièce, et, si cette épaisseur n'est pas constante, un surfaçage peut être pratiqué pour avoir un barreau d'épaisseur constante pour la mesure de la flèche.

Ces produits présentent une limite d'élasticité > 290 MPa à l'état trempé et détensionné, et > 400 MPa à l'état trempé, détensionné et revenu.

10

### Description des figures

Les figures 1 à 10 représentent les résultats comparatifs mentionnés dans les 3 exemples de manière à montrer les améliorations de propriétés apportées par les tôles selon l'invention.

15

Les figures 1 et 2 montrent l'amélioration de la stabilité à l'usinage dans le sens long (L) et dans le sens travers-long (TL) pour des tôles fortes.

La figure 3 montre pour ces tôles l'amélioration de l'anisotropie de la stabilité à l'usinage entre les sens L et TL.

Les figures 4, 5 et 6 montrent pour ces mêmes tôles l'amélioration de la tenacité dans les sens L-T, T-L et S-L.

La figure 7 illustre les résultats de tenue en fatigue.

20

La figure 8 montre l'amélioration relative à la vitesse de fissuration.

La figure 9 montre l'amélioration de l'allongement dans le sens TL sur des tôles minces.

La figure 10 montre l'amélioration de la stabilité à l'usinage pour des tôles minces.

Les figures 11 et 12 illustrent les résultats concernant la stabilité à l'usinage et les vitesses de fissuration pour des tôles moyennes.

25

### Exemples

#### Exemple 1

30

On a réalisé plusieurs coulées semi-continues de plaques en différents alliages du type 2024 selon la nomenclature de l'Aluminum Association. Toutes les plaques ont les mêmes dimensions et ont été coulées selon les mêmes procédures. Elles ont suivi une gamme de transformation classique de tôles fortes, c'est-à-dire: réchauffage avec homogénéisation, laminage à chaud, mise en solution, trempe à l'eau froide par aspersion, traction contrôlée suivant la norme EN 515 entre 1,5 et 3%, maturation à température ambiante. On obtient ainsi des tôles d'épaisseur 55 mm à l'état T351 selon la nomenclature de l'Aluminum Association. Les compositions des alliages coulés étaient les suivantes:

40

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
A1	0,11	0,23	4,32	0,63	1,43	0,022	0,11	0,02	0,014
A2	0,08	0,17	4,52	0,52	1,40	0,008	0,10	0,02	0,002
A3	0,08	0,16	4,48	0,51	1,41	0,007	0,08	0,02	0,002
A4	0,08	0,15	4,32	0,37	1,29	0,005	0,05	0,02	0,001
A5	0,08	0,16	4,44	0,54	1,30	0,008	0,08	0,02	0,002

45

On a effectué sur ces tôles les mesures suivantes:

50

- flèche après usinage selon la méthode décrite précédemment. On constate que les flèches obtenues sur les tôles en alliages A2, A3 et A4 selon l'invention sont plus faibles, en particulier dans le sens L, que pour celles en alliages A1 et A5 hors invention.
- caractéristiques mécaniques statiques (résistance à la rupture  $R_m$ , limite élastique à 0,2%  $R_{0,2}$ , allongement à la rupture A) dans le sens TL (travers de laminage) et TC (travers court)  
Les éprouvettes sens TL sont prélevées au quart épaisseur de la tôle.
- tenacités mesurées dans les sens L-T, T-L, et S-L suivant les normes ASTM E399 et B645. L'amélioration apparaît aux figures 4 à 6.
- taux de recristallisation en surface, au quart épaisseur et à mi-épaisseur, mesuré à partir de micrographies. L'ensemble des résultats ci-dessus est regroupé dans le tableau 1.

## EP 0 731 185 A1

- durées de vie en fatigue mesurées dans les directions L et T-L selon la norme ASTM E466, pour les échantillons n° 3 (alliage A1 hors invention) et n° 9 (alliage A4 selon l'invention). Les éprouvettes sont des éprouvettes plates de 3 mm, prélevées au quart épaisseur des tôles. L'usinage d'un trou central permet d'avoir un facteur de concentration des contraintes  $K_t = 2,3$ . Le chargement est avec un rapport R de la contrainte minimale à la contrainte maximale de 0,1. Les résultats indiqués au tableau 2, sont sensiblement identiques dans les sens L et TL. Ils sont représentés à la figure 7 et on constate des résultats très voisins pour les 2 alliages.
- vitesses de fissuration da/dn mesurées, également pour les échantillons n° 3 et 9, dans les directions T-L et L-T selon la norme ASTM E647, avec un rapport R = 0,1, pour des valeurs de  $\Delta K$  comprises entre 10 et 25 MPa $\sqrt{m}$ . Les éprouvettes sont des éprouvettes CT 35 prélevées au quart épaisseur des tôles. Les résultats, indiqués dans le tableau 3, sont très proches dans les deux directions. On constate sur la figure 8 que les vitesses de fissuration sont plus faibles pour l'échantillon n° 9 que pour l'échantillon n° 3.

### Exemple 2

On a coulé en semi-continu des plaques en alliage du type 2024 qu'on a soumis à une gamme de transformation classique de tôles minces plaquées, à savoir: réchauffage, colaminage à chaud avec 2 tôles de couverture en alliage 1070, refroidissement, laminage à froid, mise en solution, trempe à l'eau froide, parachèvement par planage et traction contrôlée, maturation à température ambiante. On obtient ainsi des tôles de 1,6 mm d'épaisseur à l'état T351, avec, sur chaque face, une épaisseur de placage représentant 5% de l'épaisseur de la tôle.

Les compositions de l'alliage 2024 étaient les suivantes:

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr
A6	0,09	0,19	4,38	0,63	1,50	0,013	0,10	0,024	0,014
A7	0,079	0,17	4,36	0,52	1,30	0,012	0,013	0,022	

Sur ces tôles on a mesuré:

- la flèche après usinage suivant la méthode décrite précédemment. On constate que, pour l'alliage A7 selon l'invention, ces flèches sont nettement réduites, aussi bien dans le sens L que dans le sens TL, par rapport à l'alliage A6 hors invention, et qu'on vérifie la relation: fe < 0,04 R.
- les caractéristiques mécaniques statiques suivant le sens TL (moyenne de 2 éprouvettes prélevées dans le sens travers du laminage et de 4 tôles par alliage).

Les résultats sont repris dans le tableau 4. On constate à la figure 9 une amélioration de l'allongement dans le sens TL de l'alliage A7 par rapport à A6, et, sur la figure 10, une diminution de la flèche à l'usinage entre ces mêmes alliages.

### Exemple 3

On a coulé par coulée semi-continue des plaques de mêmes dimensions et suivant la même procédure de coulée. Ces plaques ont suivi une gamme de transformation classique de tôles moyennes, c'est-à-dire: réchauffage, laminage à chaud, mise en solution, trempe à l'eau froide, traction contrôlée, maturation à température ambiante. On obtient ainsi des tôles d'épaisseur 12 mm à l'état T351 de composition:

Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr
A8	0,08	0,17	4,45	0,53	1,46	0,007	0,005	0,06	0,02	0,002

On a mesuré sur ces tôles:

- la flèche après usinage selon la procédure décrite précédemment,
- les caractéristiques mécaniques statiques suivant le sens TL (travers de laminage),
- le taux de recristallisation en surface, au quart épaisseur et à mi-épaisseur.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5 et illustrés aux figures 11 et 12.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

Tableau 1:

TOLE	n° e (mm)	Alliage	FLÈCHE RECRYSTALLISATION (mm)	Surface	Quant	Mi-ép.	PROPRIÉTÉS PHYSIQUE									
							Ecart Surface - Mi-ép.	Rm	R0.2	A%	Rm	R0.2	A%	L-T	T-L	S-L
1	.55	A1	210	120				478	351	13.6	431	306	5.9			
2	.55	"	231	55				468	342	15.7	432	306	6.1			
3	.55	"	207	79	79	58	30	49	470	341	15.3	432	306	6.2	37.1	
														32.2	22.2	
4	.55	A2	57	43	99	95	71	28	461	330	16.5	419	315	7	44.4	38.1
5	.55	"	46	33	100	95	69	31	462	329	17.2	417	314	6.3	44	40.9
6	.55	"	42	31	100	96	68	32	462	329	16.9	422	312	7.1	45.3	38.5
7	.55	A3	57	62	97	84	63	34	468	343	17.7	421	320	5.4		
8	.55	"	100	70	96	68	62	34	481	358	14.7	422	315	4.9	43.2	37.2
															26.1	
9	.55	A4	49	73	99	93	70	29	463	332	14.4	425	299	8.5	51.8	43.8
															29.6	
10	.55	A5	156	9	95	82	64	31	470	344	16.5	425	312	6.1		
11	.55	"	128	1	96	86	62	34	468	336	17.4	418	314	5.1		
12	.55	"	150	25	99	88	70	29	469	338	16.1	418	314	6		

Rm, R0.2 en MPa

Ténacité en MPa $\sqrt{m}$

Tableau 2 : Résultats de fatigue des tôles n°3 et 9  
(Kt=2.3, R=0.1)

Tôle n°3	Seus	Cohérence initiale (MPa)	Durée de vie (h)	Coef. de variation (%)	Coef. de variation (%)
Tl	TL	260	21000	TL	300
L	L	260	20000	L	300
Tl	TL	230	31000	TL	280
L	L	230	33000	L	280
Tl	TL	230	33000	TL	260
L	L	230	35000	L	260
Tl	TL	230	35000	TL	240
Tl	TL	210	47000	L	240
L	L	210	51000	TL	222
Tl	TL	180	131000	L	210
L	L	180	140000	TL	200
Tl	TL	160	279000	TL	190
L	L	160	150000	L	190
Tl	TL	150	15553000	TL	180
Tl	TL	170	147000	L	180
L	L	170	173000	TL	160
Tl	TL	160	420000	L	160
L	L	160	256000	TL	150
Tl	TL	170	121000	L	150
L	L	170	139000	TL	140
Tl	TL	160	234000	L	140
					7834500

Tableau 3 :

5

Tableau 3 : <u>Données de simulation</u>	
10	1.0E-04
15	4.0E-04
20	7.0E-04
25	2.5E-03

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Tableau 3 : <u>Données de simulation</u>	
10	2.0E-05
15	1.0E-04
20	6.0E-04
25	2.0E-03

**Tableau 4 :**

n° d'éle	Alliage	$\epsilon_l$ (mm)	$f_L$	$f_{TL}$	$R_m$ (MPa)	$R_{0.2}$ (MPa)	A.%
13	A6	1.6	4000	3000	440	305	20.05
14	A6	1.6	3000	4000	440.5	301.5	20.95
15	A6	1.6	4000	3500	441	298.5	21.55
16	A6	1.6	3500	3000	443	301	21.25
<b>Moyenne</b>		<b>3625</b>	<b>3375</b>	<b>441.1</b>	<b>301.5</b>	<b>21.0</b>	
17	A7	1.6	500	0	439.5	294	24.55
18	A7	1.6	1500	1500	438.5	277.5	24.4
19	A7	1.6	2000	1500	440	290	23.85
20	A7	1.6	1000	0	441	289.5	25
<b>Moyenne</b>		<b>1250</b>	<b>750</b>	<b>439.8</b>	<b>287.8</b>	<b>24.5</b>	

Tableau 5 :

n° tôle	e. (mm)	Alliage	fL	fTL	Surface	quant	Cocur	Ecart Surface - Cocur	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES			
									T <sub>m</sub>	R <sub>m</sub> (MPa)	R <sub>0.2</sub> (MPa)	A%
21	12	A8	240	480	90	90	67	23		465	335	15
22	12	A8	710	90	100	99	97	3		470	339	15

**Revendications**

1. Tôle en alliage d'aluminium AlCuMg d'épaisseur > 0,5 mm, de composition (% en poids):
  - 5      3,5 < Cu < 5,0
  - 1,0 < Mg < 2,0
  - Si < 0,25
  - Fe < 0,25
  - Mn < 0,55
  - total autres éléments: < 0,25
  - 10     avec 0 < Mn - 2Fe < 0,2
  - éventuellement plaquée d'un autre alliage d'aluminium, l'épaisseur totale du placage étant d'au plus 12% de l'épaisseur totale de la tôle plaquée, cette tôle présentant en tout point un taux de recristallisation > 50% et un écart de ce taux entre la surface et la mi-épaisseur < 35%,
  - 15     et présentant à l'état trempé et tractionné ou trempé, tractionné et revenu une flèche après usinage à mi-épaisseur d'un barreau reposant sur 2 supports distants d'une longueur  $l$  telle que:  

$$fe < 0,14 l^2$$

$fe$  étant la flèche exprimée en microns,  $e$  l'épaisseur de la tôle en mm et  $l$  la longueur du barreau en mm.
2. Tôle selon la revendication 1 caractérisée en ce que  $fe < 0,09 l^2$ .
- 20     3. Tôle selon la revendication 2, caractérisée en ce que:  

$$fe < 0,06 l^2$$
- 25     4. Tôle mince d'épaisseur comprise entre 0,5 et 3 mm selon la revendication 3, caractérisée en ce que:  

$$fe < 0,04 l^2$$
- 30     5. Tôle selon l'une des revendications 1 à 4 dans laquelle  

$$Fe < 0,20.$$
- 35     6. Tôle selon l'une des revendications 1 à 5 dans laquelle  $Si < 0,17$ .
7. Tôle selon la revendication 6 dans laquelle  $Si < 0,10$ .
- 35     8. Tôle selon l'une des revendications 1 à 7 dans laquelle  $Cu < 4,0$ .
9. Tôle selon l'une des revendications 1 à 8 dans laquelle  $Mg < 1,5$ .
- 40     10. Tôle selon l'une des revendications 1 à 9 caractérisée en ce que  $Mn < 0,4$ .
- 45     11. Tôle selon l'une des revendications 1 à 10 présentant entre les barreaux usinés à mi-épaisseur dans les sens  $L$  et  $TL$  une isotropie des flèches après usinage telle que:  

$$(flèche barreau L) < 1,5 \times (flèche barreau TL).$$
- 45     12. Tôle selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisée en ce qu'elle présente à l'état trempé et tractionné une limite élastique dans le sens  $TL > 290$  MPa.
- 50     13. Tôle selon l'une des revendications 1 à 11 présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une limite élastique dans le sens  $TL > 400$  MPa.
14. Tôle plaquée selon l'une des revendications 1 à 11 présentant à l'état trempé et tractionné une limite élastique dans le sens  $TL > 270$  MPa.
- 55     15. Tôle plaquée selon l'une des revendications 1 à 11, présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une limite élastique > 380 MPa.
16. Tôle selon l'une des revendications 1 à 15 présentant une tenue en fatigue telle que les contraintes maximales

acceptables à nombre de cycles donné soient supérieures respectivement à:

- 295 MPa pour  $10^4$  cycles
- 160 MPa pour  $10^5$  cycles
- 100 MPa pour  $10^6$  cycles
- 100 MPa pour  $10^7$  cycles.

- 5      17. Tôle d'épaisseur > 20 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant à l'état trempé tractionné une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens L-T > 35 MPaVm.
- 10     18. Tôle d'épaisseur > 20 mm selon l'une des revendications 1 à 17 présentant à l'état trempé tractionné une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens T-L > 32 MPavm.
- 15     19. Tôle selon la revendication 17 présentant à l'état trempé tractionné une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens L-T > 40 MPavm.
- 20     20. Tôle selon la revendication 18 présentant à l'état trempé tractionné une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens T-L > 35 MPavm.
- 25     21. Tôle d'épaisseur > 35 mm selon l'une des revendications 17 à 20 présentant une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens S-L > 22 MPaVm.
- 30     22. Tôle selon la revendication 21 présentant une tenacité dans le sens S-L > 24 MPaVm.
- 35     23. Tôle d'épaisseur > 20 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens L-T supérieure à 28 MPaVm.
- 40     24. Tôle d'épaisseur > 20 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens T-L > 25 MPaVm.
- 45     25. Tôle selon la revendication 23 présentant une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens L-T > 32 MPaVm.
- 50     26. Tôle selon la revendication 24 présentant une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens T-L > 28 MPaVm.
- 55     27. Tôle d'épaisseur > 35 mm selon les revendications 23 à 26 présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens S-L > 18 MPaVm.
- 60     28. Tôle selon la revendication 27 présentant à l'état trempé, tractionné et revenu une tenacité  $K_{1c}$  dans le sens S-L > 20 MPaVm.
- 65     29. Tôle d'épaisseur > 20 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant une vitesse de fissuration da/dn inférieure à:
- 70        5  $10^{-5}$  mm/cycle pour  $\Delta K = 10$  MPavm
- 75         $10^{-4}$  mm/cycle pour  $\Delta K = 15$  MPavm
- 80        6  $10^{-4}$  mm/cycle pour  $\Delta K = 20$  MPavm
- 85        2  $10^{-3}$  mm/cycle pour  $\Delta K = 25$  MPavm
- 90     30. Tôle d'épaisseur < 20 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant une tenacité  $K_{cb}$  dans le sens T-L > 110 MPaVm.
- 95     31. Tôle d'épaisseur < 12 mm selon l'une des revendications 1 à 16 présentant une rugosité  $R_a$  après usinage chimique < 6 microns.
- 100    32. Tôle d'épaisseur < 4 mm selon la revendication 31 présentant une rugosité après usinage chimique < 3 microns.
- 105    33. Produit filé, forgé ou matricé en alliage d'aluminium AlCuMg de composition (% en poids):  
3,5 < Cu < 5,0

1,0 < Mg < 2,0

Si < 0,25

Fe < 0,25

Mn < 0,55

5 total autres éléments < 0,25

avec: 0 < Mn - 2Fe < 0,2

présentant en tout point un taux de recristallisation > 50% et un écart de ce taux entre surface et mi-épaisseur < 35%,

10 et présentant à l'état trempé ou trempé revenu, une flèche f après usinage à mi-épaisseur d'un barreau reposant sur deux supports distants d'une longueur l, telle que:

f < 0,14 l<sup>2</sup> et de préférence:

f < 0,09 l<sup>2</sup>

f étant mesurée en microns, e étant l'épaisseur locale moyenne du produit au point de mesure et l étant également mesurée en mm.

15

34. Produit selon la revendication 33 présentant à l'état trempé détensionné une limite d'élasticité R<sub>0,2</sub> > 290 MPa.

35. Produit selon la revendication 33 présentant à l'état trempé, détensionné et revenu une limite d'élasticité > 400 MPa.

20

25

30

35

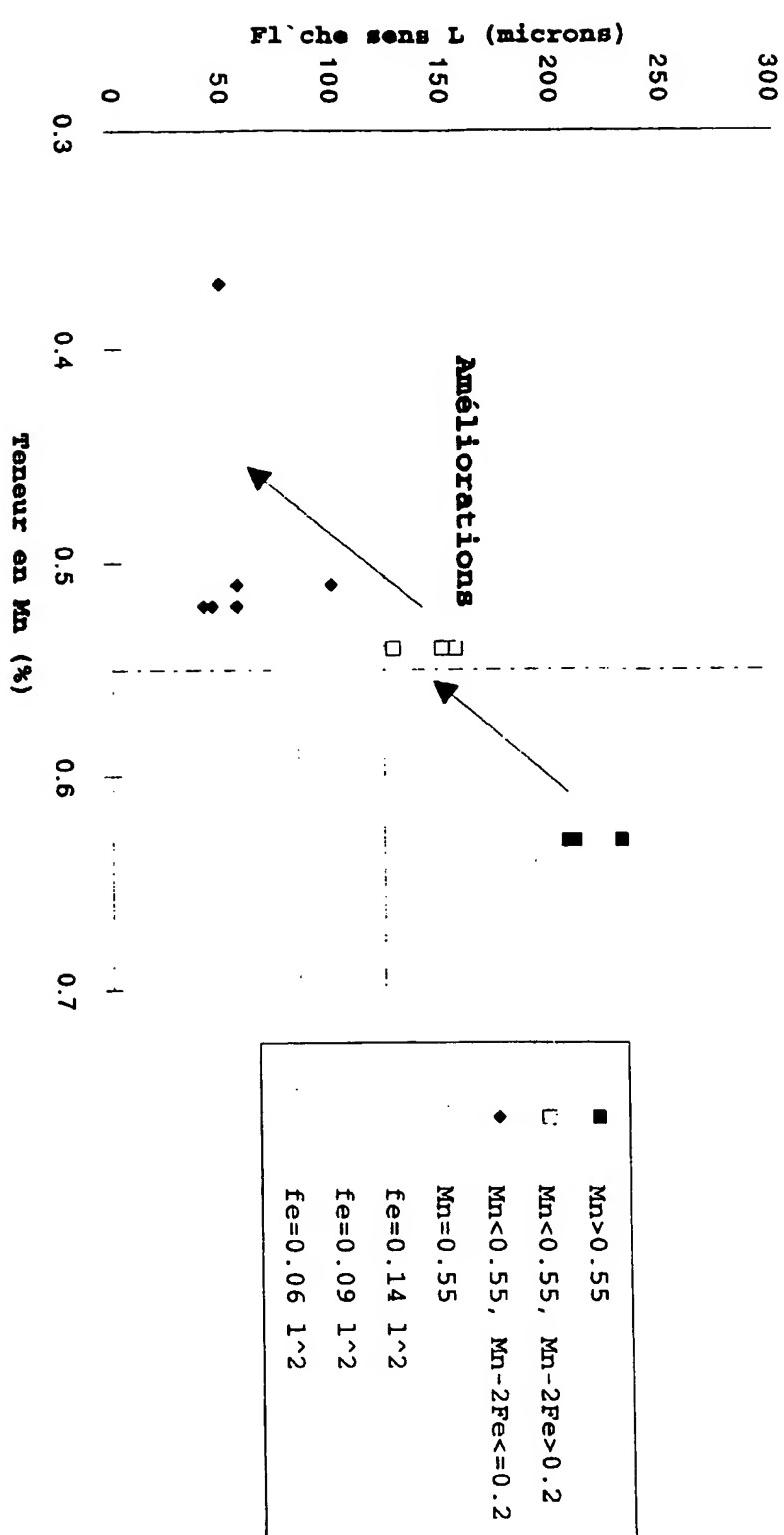
40

45

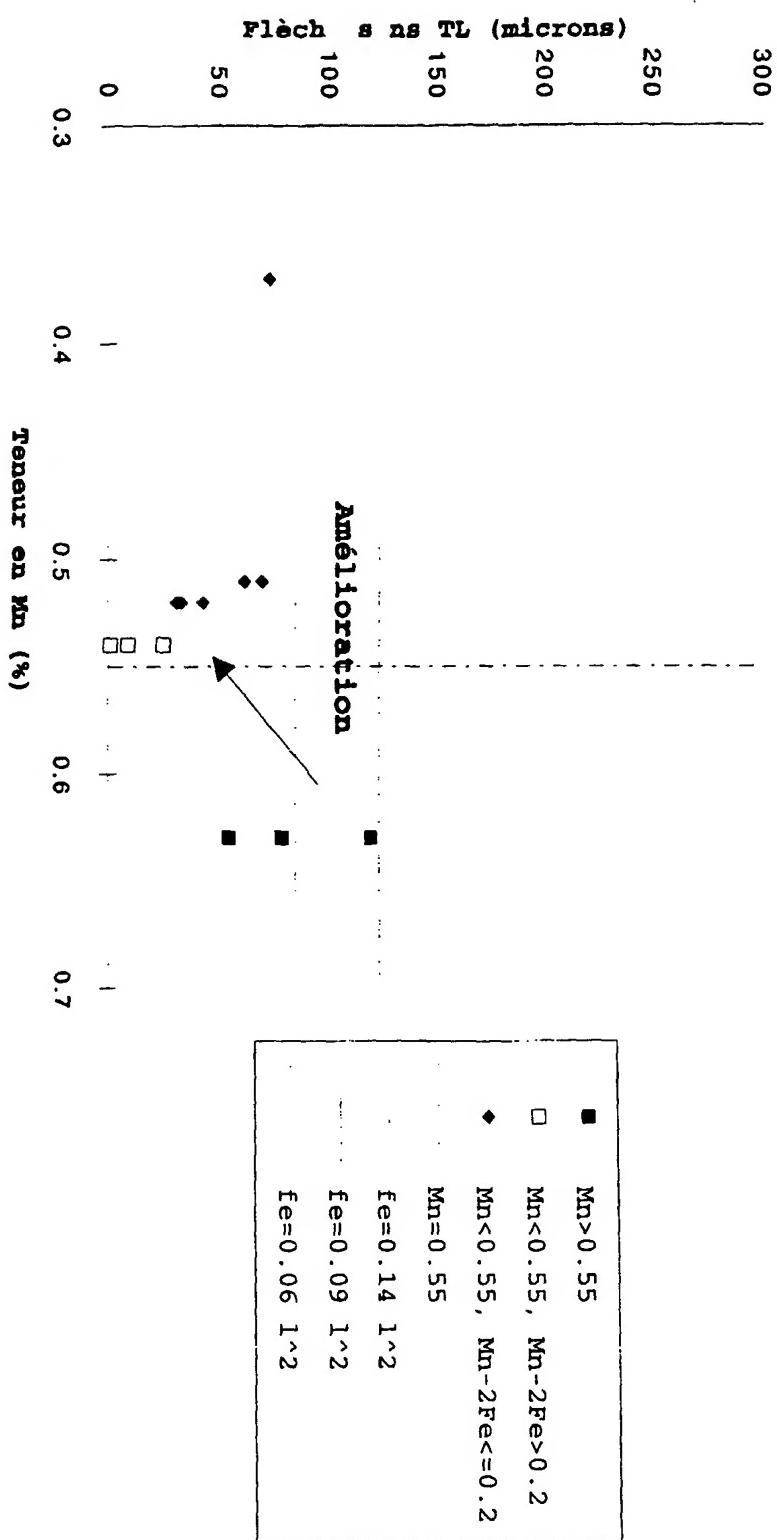
50

55

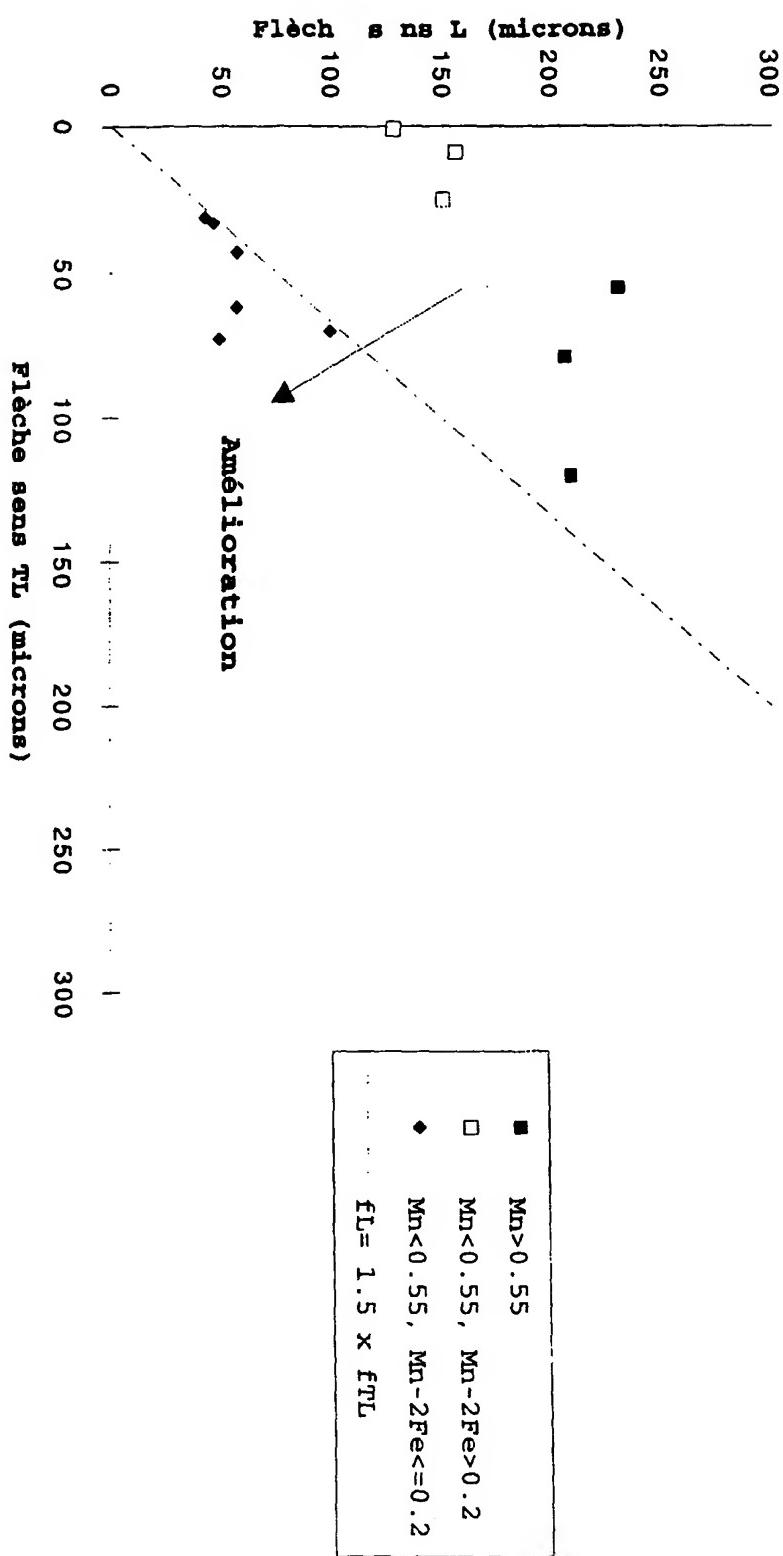
**Figure 1 : Amélioration de la stabilité à l'usinage dans le sens Long (L)**



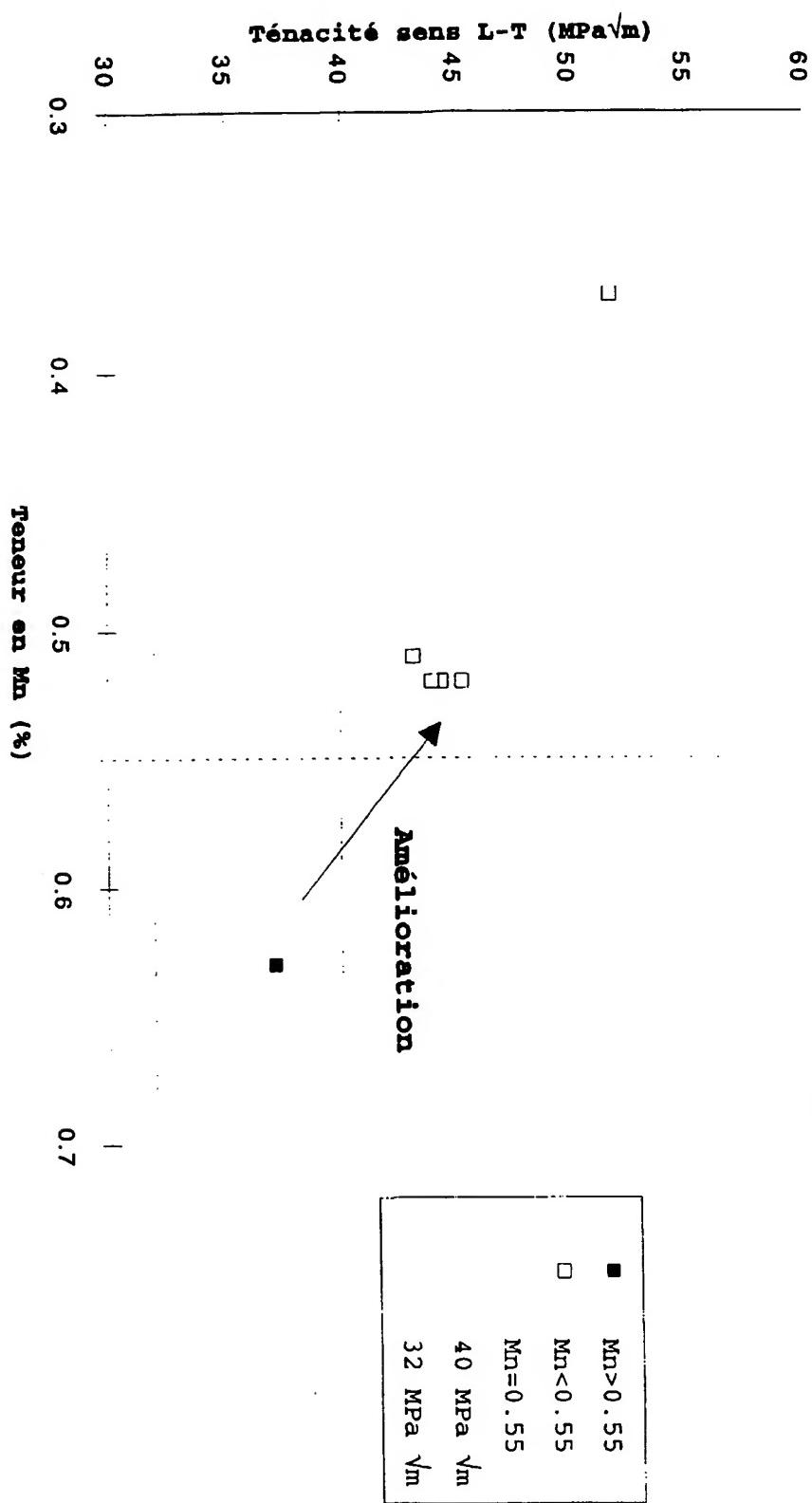
**Figure 2 : Amélioration de la stabilité à l'usinage dans le sens Travers-Long (TL)**

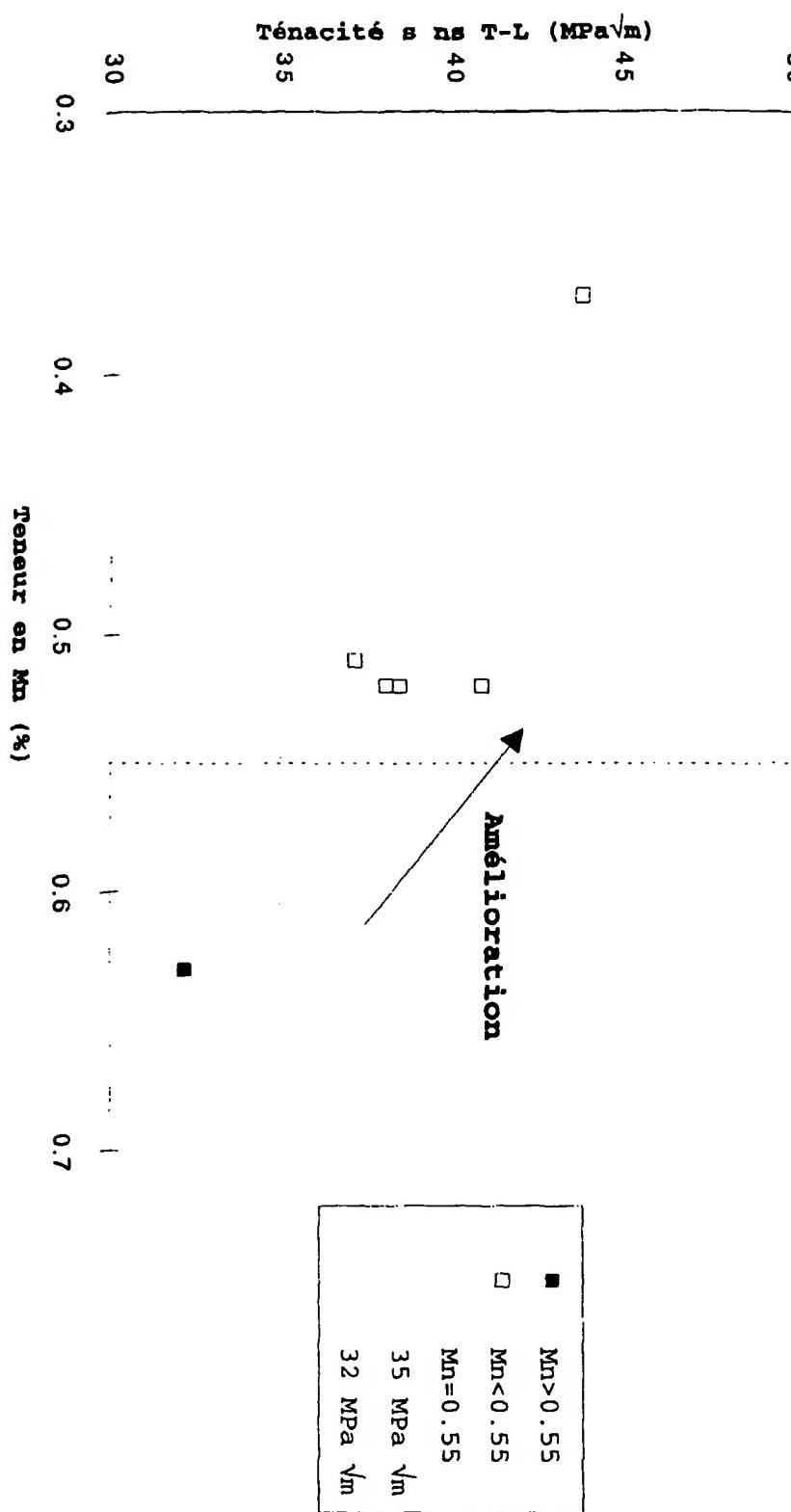


**Figure 3 : Amélioration de l'isotropie de la stabilité à l'usinage**

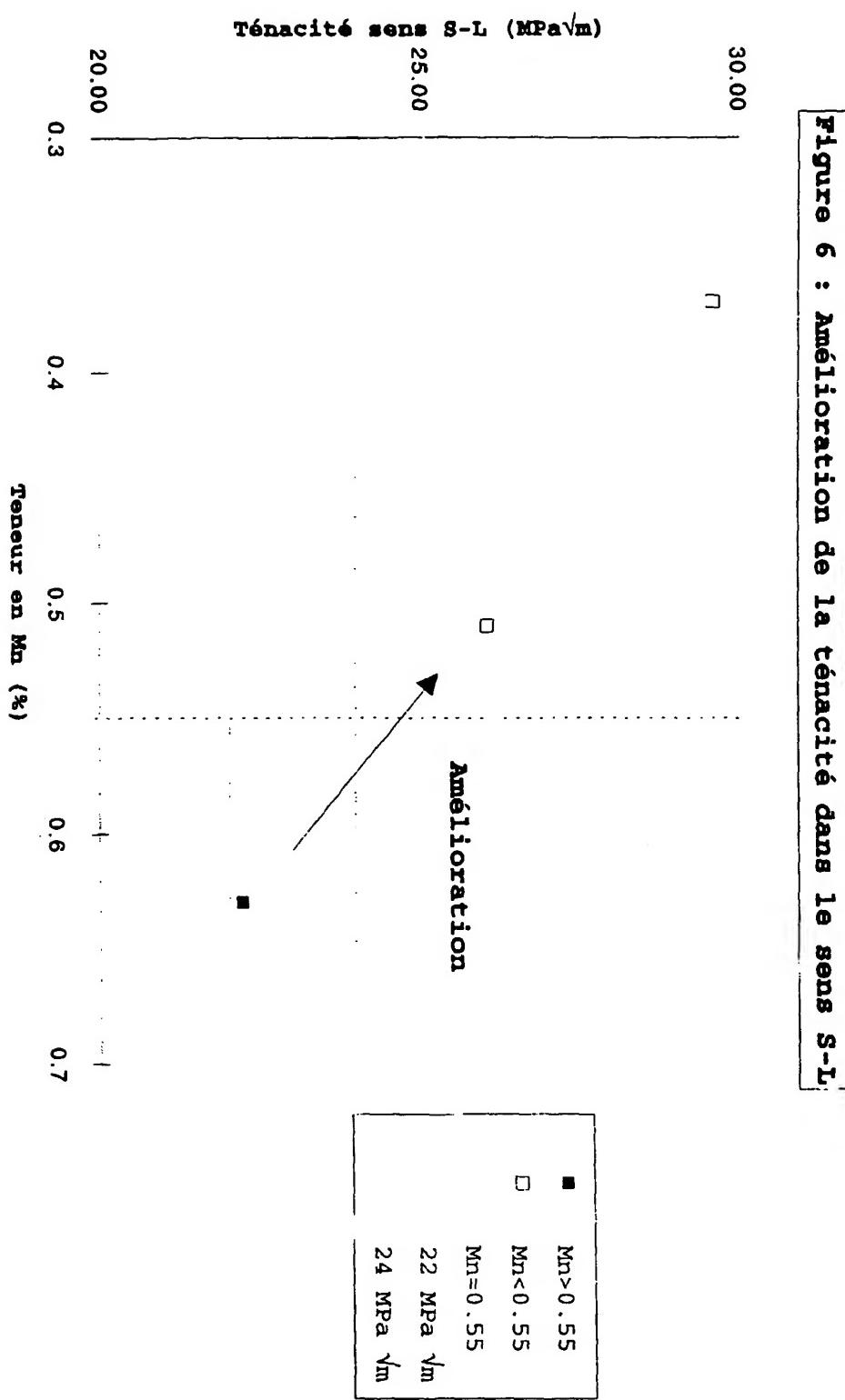


**Figure 4 : Amélioration de la ténacité dans le sens L-T**





**Figure 5 : Amélioration de la ténacité dans le sens T-L**



**Figure 6 : Amélioration de la ténacité dans le sens S-L**

**Figure 7 : Résultats de fatigue**  
**(Kt=2.3, R=0.1)**

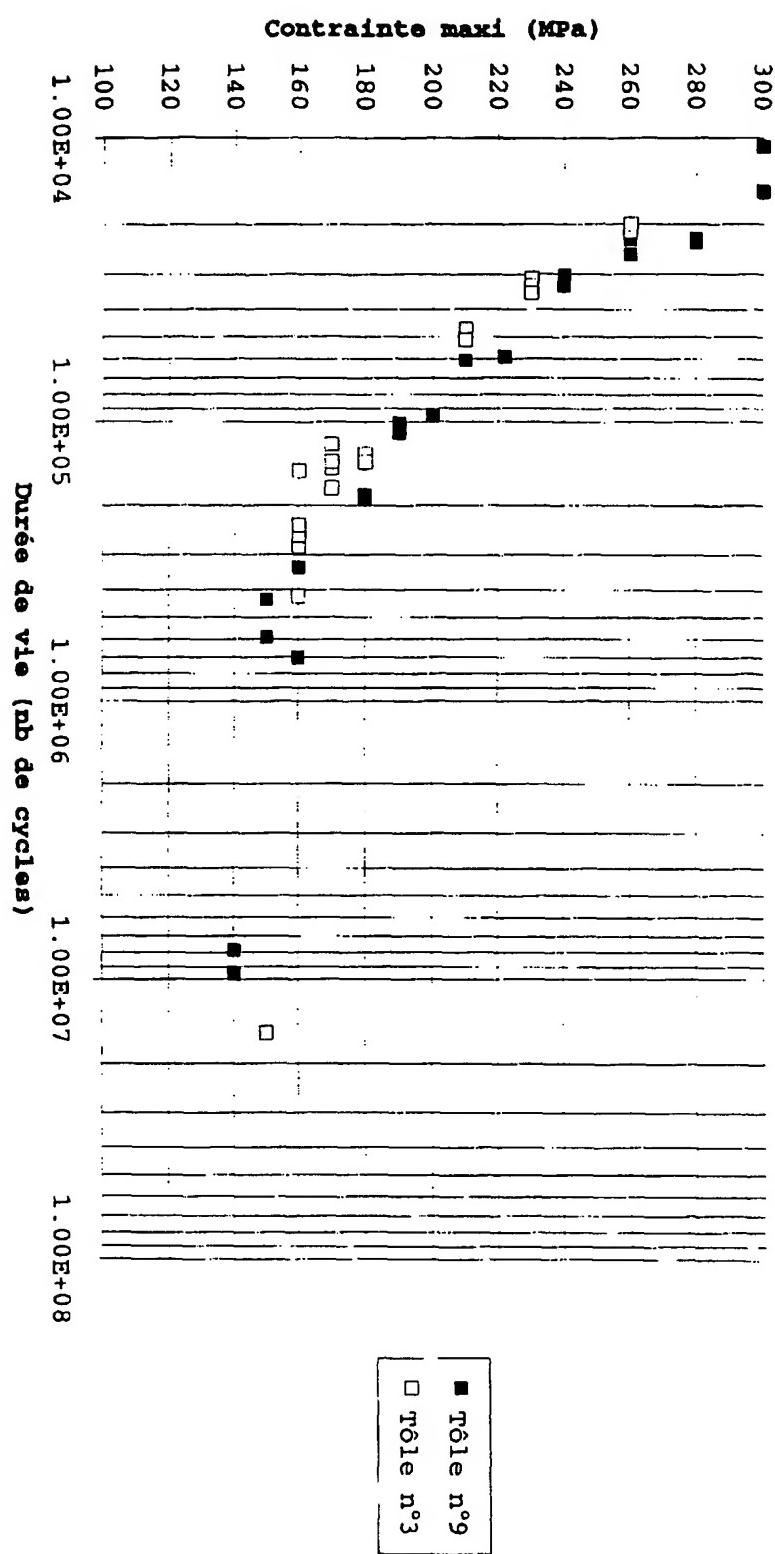
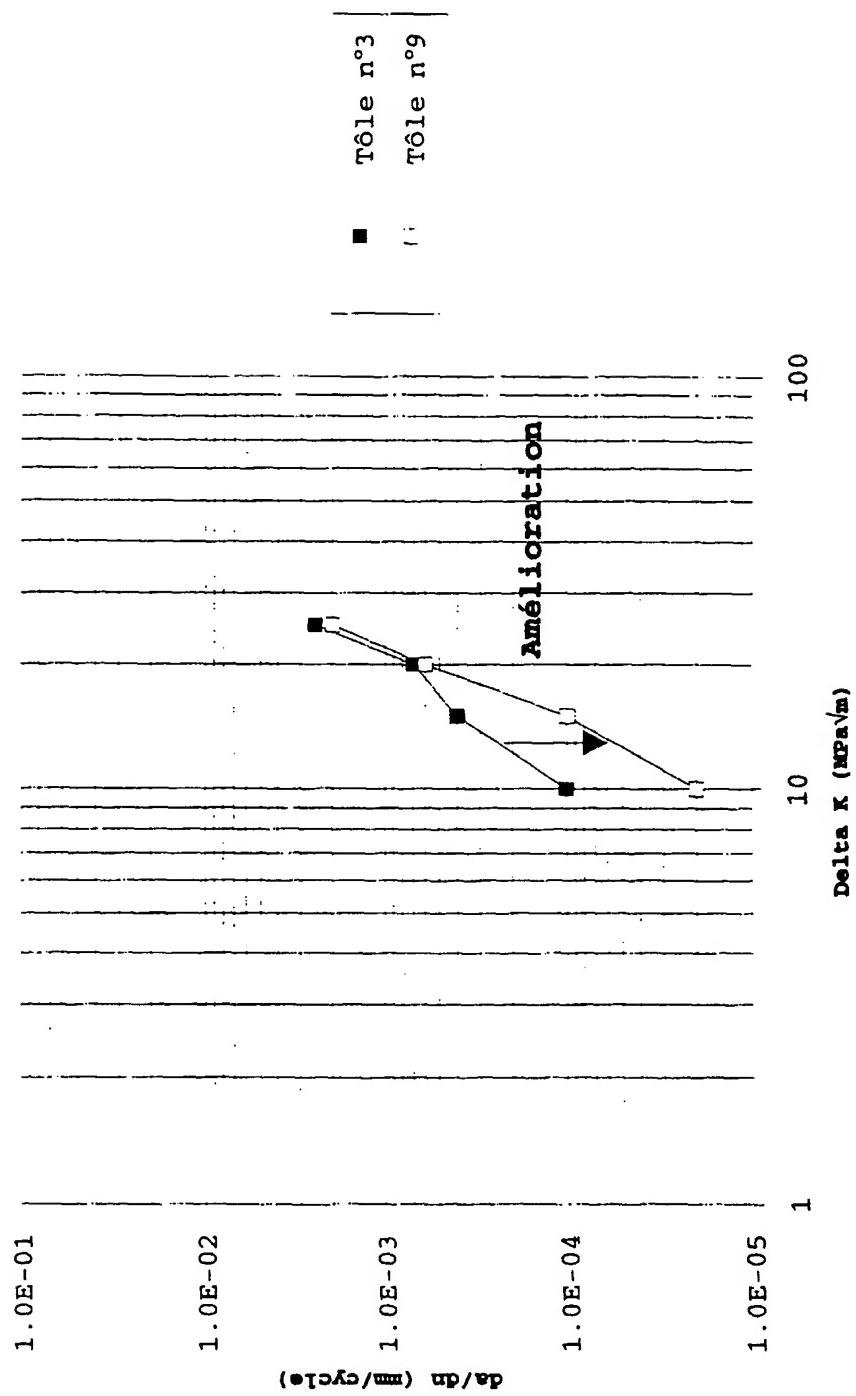
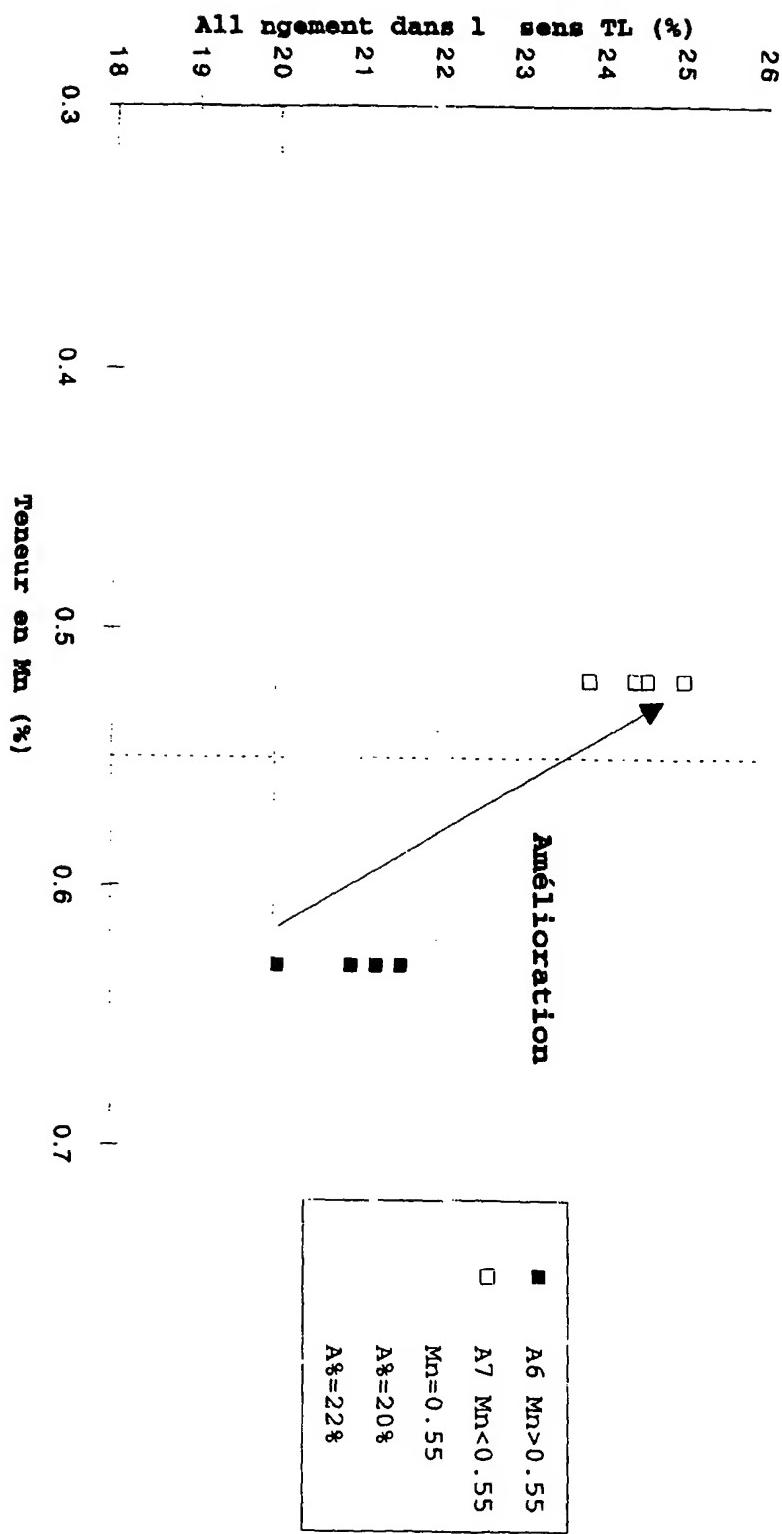


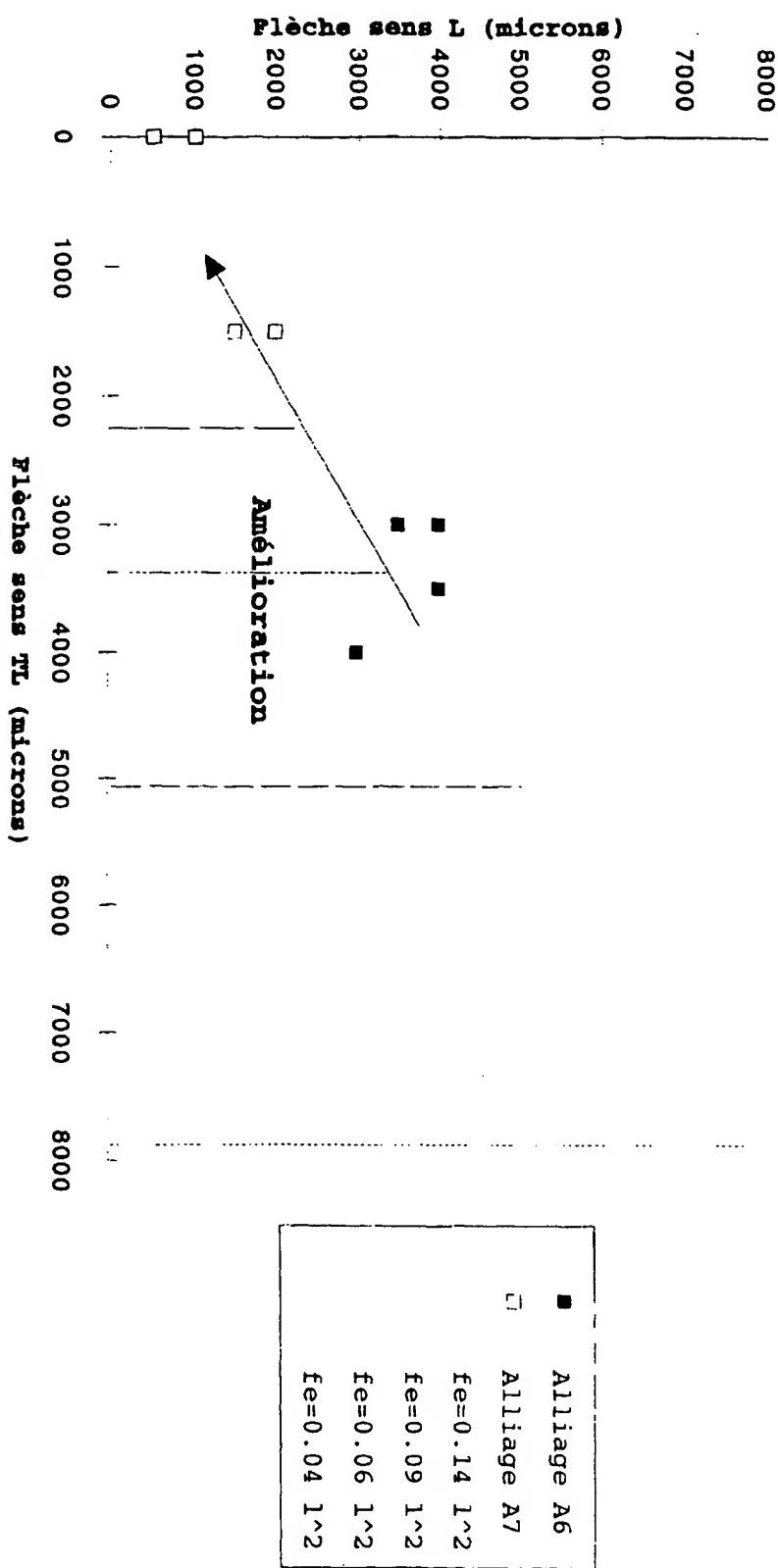
Figure 8 : vitesses de fissuration des tôles n°3 et n°9



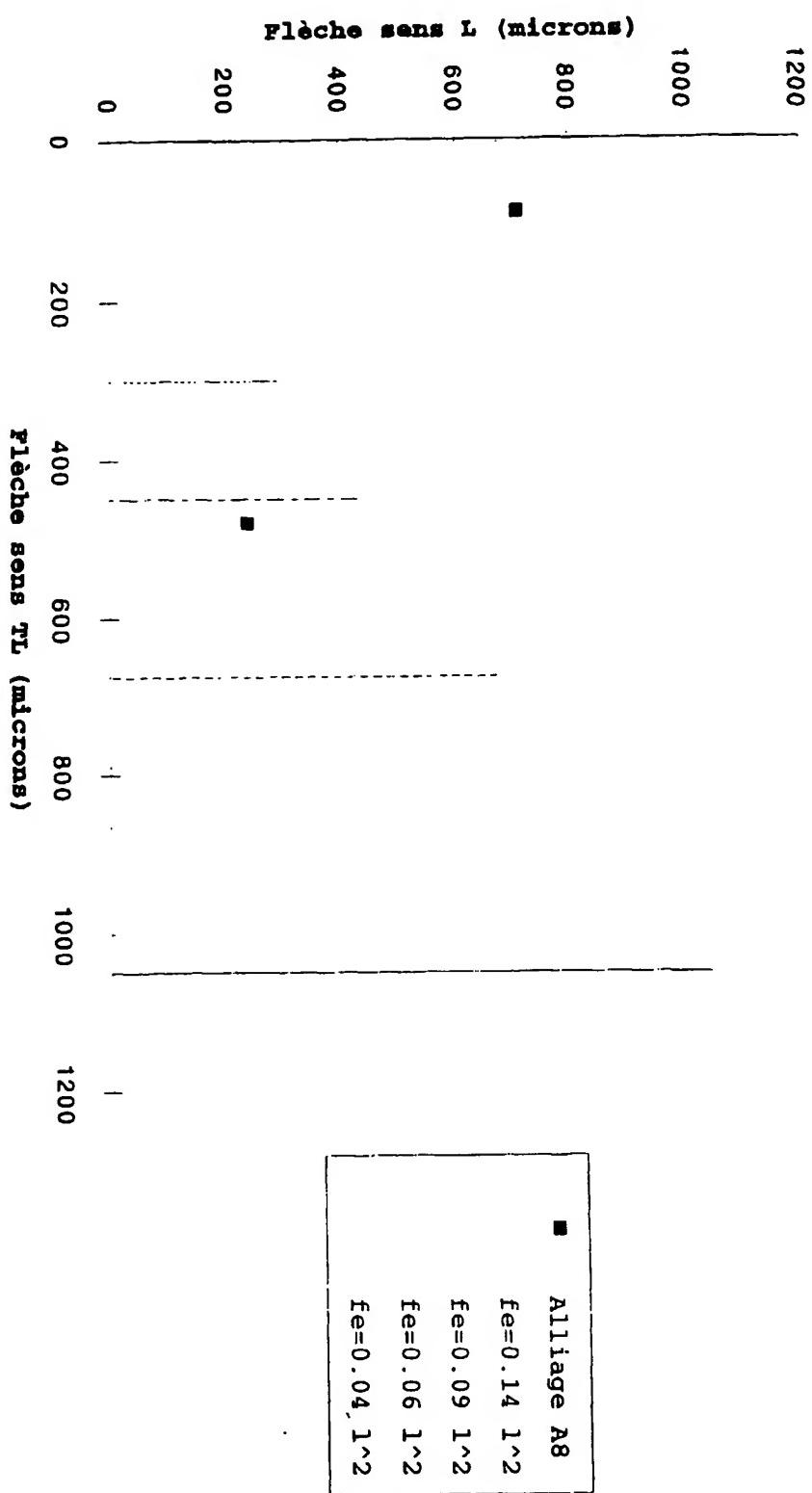


**Figure 9 : Amélioration de l'allongement dans le sens Transversal sur des tôles minces (1.6 mm)**

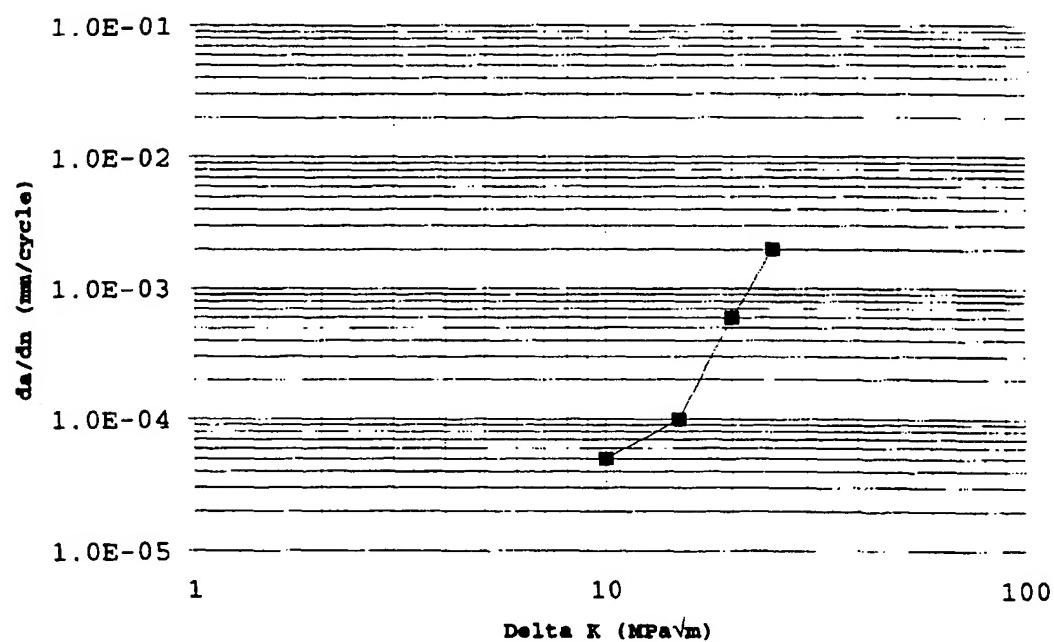
**Figure 10 : Amélioration de la stabilité à l'usinage sur des tôles minces (1.6 mm)**



**Figure 11 : Stabilité à l'usinage de tôles moyennes de 12 (mm)**



**Figure 12 : Vitesses de fissuration**





Office européen  
des brevets

## RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

N° de la demande  
EP 96 42 0077

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int.Cl.6)
X	EP-A-0 473 122 (ALUMINUM COMPANY OF AMERICA) *Revendications 1-20*	1,12-15, 17-28	C22C21/16
X	US-A-3 826 688 (LEVY) --- *Revendications 1-7, 10, 11, 15, 16; Table I, Examples 23004, 25930, 23095, 25943, 25983, 25982, 25939, 25931, 24259, 25987, 26625, 26626*	1,12-15	
Y	FR-A-959 650 (SOCIATA CENTRALE DES ALLIAGES LAGERS) *Page 2, l. 14-26*	1	
Y	US-A-2 296 866 (C.M.MOSS) *Page 2, Exemple 8*	1	
A	GB-A-572 210 (IMPERIAL CHEMICAL INDUSTRIES)	1	
A	* le document en entier * & DE-C-867 166 (I.C.I.) -----	1	DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int.Cl.6)
			C22C
<p>Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications</p>			
Lieu de la recherche	Date d'achèvement de la recherche	Examinateur	
LA HAYE	14 Juin 1996	Lippens, M	
CATÉGORIE DES DOCUMENTS CITÉS			
X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : aperçu-plan technologique O : divulgation non écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	